پژوهش‌های کاربردی در مهندسی زیرساخت‌ها

سال یکم، شماره یکم، پیاپی یکم، بهار و تابستان ۱۴۰۵ (۳۵-۵۲)

«مقاله پژوهشی»

ارزیابی اثر جوان‌ساز و پلیمر بازیافتی بر عملکرد مقاومت ترک‌خوردگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی

پیمان صادقی[۱]، احمد گلی[۲]*

۱. کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران، مهندسی راه و ترابری، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
۲. دانشیار مهندسی عمران، گرایش راه وترابری، دانشگاه اصفهان، دانشکده عمران و حمل و نقل، اصفهان، ایران.

نویسنده مسئول:
احمد گلی
رایانامه: a.goli@trn.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

استناد به این مقاله:
صادقی، پیمان و گلی، احمد.(۱۴۰۵). ارزیابی اثر جوان‌ساز و پلیمر بازیافتی بر عملکرد مقاومت ترک‌خوردگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی. *پژوهش‌های کاربردی در مهندسی زیرساخت‌ها*، ۱(۱)، ۳۵-۵۲.

چکیده

استفاده از آسفالت بازیافتی[۱] (RAP) به‌دلیل محدودیت منابع طبیعی نظیر قیر و سنگدانه‌ها، همچنین مسائلی همچون گرمایش جهانی، افزایش گازهای گلخانه‌ای و چالش‌های اقتصادی اهمیت روزافزونی پیدا کرده است. با این‌حال، به‌کارگیری RAP در مخلوط‌های آسفالتی به‌دلیل وجود قیر پیرشده، می‌تواند موجب کاهش عملکرد در برابر ترک‌خوردگی شود. برای غلبه بر این مشکلات، استفاده از جوان‌سازها[۲] پیشنهاد شده است. با این حال، استفاده از جوان‌ساز ممکن است بر عملکرد در دماهای بالا و مقاومت در برابر شیارشدگی[۳] تأثیر منفی بگذارد. در این پژوهش، ابتدا از جوان‌سازهای مختلف به‌منظور بهبود مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP استفاده شد و سپس برای مقابله با کاهش مقاومت شیارشدگی از پلی‌اتیلن بازیافتی با چگالی بالا (R-HDPE[۴]) استفاده شد. در این پژوهش سه نوع جوان‌ساز مختلف شامل روغن موتور ضایعاتی (WEO[۵])، اسیداولئیک[۶] و VB[۷] مورد استفاده قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌ها، از سه درصد مختلف RAP (۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰ ٪) استفاده شد. سپس هرکدام از جوان‌سازها و پلیمرها در چهاردرصد مختلف (به‌طور جداگانه و ترکیبی) به مخلوط‌های آسفالتی حاوی 50% RAP اضافه شد. درنهایت عملکرد نمونه‌ها در دمای میانی و بالا مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین‌منظور، تست مقاومت شیارشدگی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و تست SCB[۸] در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از جوان‌ساز و پلیمر، بدون کاهش مقاومت شیارشدگی، می‌تواند به بهبود مقاومت در برابر ترک‌خوردگی کمک کند.

واژه‌های کلیدی

آسفالت بازیافتی (RAP)، جوان‌ساز، پلیمر بازیافتی، ترک‌خوردگی، شیارشدگی.

1. Reclaimed asphalt pavement
2. Rejuvenator
3. Rutting
4. Recycled high density polyethylene (r-hdpe)
5. Waste engine oil
6. Oleic acid
7. Vacuum bottom
8. Semicircular bending

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۴ ©. ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.
این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.
Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱. مقدمه

زیرساخت‌های جاده‌ای از اهمیت بسیاری در توسعه جوامع امروزی برخوردارند و برای همین بسیاری از آژانس‌های جاده‌ای سالانه بخش عمده‌ای از بودجه خود را به ساخت، تعمیر و نگهداری جاده‌ها اختصاص می‌دهند. با این حال، فرایند ساخت و تعمیر جاده‌ها خود یکی از عوامل اصلی تولید زباله در سطح جهانی است. به‌طور خاص، این بخش حدود ۳۴ درصد از کل پسماندهای تولیدی را به خود اختصاص می‌دهد. از این‌رو، به‌کارگیری روش‌های بهینه در توسعه جاده‌ها که هم از نظر اقتصادی و هم زیست‌محیطی مناسب باشد، بیش از پیش ضروری است [۱, ۲].

درحال حاضر، سیستم‌های مدیریت ساخت و نگهداری جاده‌ها بیشتر بر روی تعمیر و نگهداری جاده‌های موجود متمرکز هستند تا ساخت جاده‌های جدید. این رویکرد موجب تولید مقادیر زیادی RAP (مواد آسفالتی بازسازی‌شده) می‌شود و انتظار می‌رود تولید RAP در آینده افزایش یابد. ذخیره‌سازی این مواد در طول زمان می‌تواند اثرات منفی بر محیط‌زیست داشته باشد. از سوی دیگر، مخلوط‌های آسفالتی از منابع غیرقابل تجدید هستند و استفاده گسترده از آن‌ها نیاز به مقدار زیادی قیر دارد که افزایش قیمت نفت خام و کاهش منابع آن، فشار زیادی را بر منابع اقتصادی وارد می‌آورد. بنابراین، توسعه روش‌های مهندسی برای استفاده مجدد از RAP در شرایط فعلی ضروری است. استفاده از RAP در مخلوط‌های آسفالتی نه‌تنها می‌تواند مزایای اقتصادی را به‌دنبال داشته باشد، بلکه موجب کاهش مصرف قیر و منابع سنگدانه‌ای می‌شود و درنهایت به کاهش آلاینده‌ها و صرفه‌جویی در انرژی از منظر تحلیل هزینه چرخه عمر می‌انجامد [۳]. استفاده از RAP به‌ویژه در کاهش تقاضا برای مواد اولیه و هزینه‌های تولید مخلوط‌های آسفالتی جدید مؤثر است [۱].

با وجود این، استفاده از RAP چالش‌هایی نیز دارد. یکی از نگرانی‌های اصلی در استفاده از مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP، تغییر خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر است. با افزایش درصد RAP، به‌دلیل تبخیر و اکسیدشدن قیر کهنه، بسیاری از ویژگی‌های آن تغییر می‌کند و در دماهای مختلف عملکرد متفاوتی از خود نشان می‌دهد. به‌طور خاص، عملکرد قیر در دماهای بالا بهبود می‌یابد، اما در دماهای میانی و پایین، مخلوط‌های آسفالتی رفتار شکننده‌تری دارند و مستعد ترک‌خوردگی می‌شوند [۴–۷]. بنابراین، استفاده از RAP در تولید مخلوط‌های آسفالتی در بسیاری از کشورها محدود به درصدهای پایین (۱۵–۲۵٪) است [۸]. با این حال، استفاده از درصدهای بالاتر از RAP با افزودن مواد افزودنی مختلف امکان‌پذیر است [۹]. راهکارهای مختلفی مانند استفاده از قیر بکر، عوامل جوان‌ساز، قیر نرم‌تر، پلیمرها و غیره برای بهبود عملکرد RAP پیشنهاد شده‌اند [۱۰]. افزون‌بر این، افزایش مقدار قیر بکر به‌دلیل هزینه‌های آن ازلحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. به همین‌دلیل، استفاده از قیرهای نرم‌تر و جوان‌کننده‌ها به‌عنوان اولویت اقتصادی مطرح است [۱۱]. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از جوان‌کننده‌ها می‌تواند خواص فیزیکی و شیمیایی قیرهای قدیمی را بهبود بخشد [۱۲]. از این‌رو، جوان‌کننده‌ها به‌عنوان ابزاری برای بازیابی خواص ازدست‌رفته قیر کهنه معرفی می‌شوند تا بتوان از درصدهای بیشتری از RAP در مخلوط‌ها استفاده کرد [۱۳, ۱۴]. جوان‌کننده‌ها به‌طور کلی ویسکوزیته کمی دارند و محتوای آروماتیک بالایی دارند که می‌تواند اجزای سبک ازدست‌رفته در قیر RAP را بازیابی‌کرده و ساختار کلوئیدی آن را بهبود بخشد، درنتیجه خواص قیر پیرشده بهبود می‌یابد [۱۵, ۱۶].

استفاده از جوان‌کننده‌ها در مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAPدر سال‌های اخیر به‌شدت افزایش یافته است. این مواد به‌ویژه برای بهبود مقاومت در برابر خستگی در دمای میانی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مفید هستند. با این حال، استفاده از جوان‌کننده‌های مختلف به‌دلیل ماهیت روغنی آن‌ها، ممکن است منجر به کاهش مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP شود. بنابراین، استفاده از اصلاح‌کننده‌های دیگر که بتوانند مقاومت در برابر شیارشدگی را بهبود دهند و درعین‌حال مقاومت خستگی و ترک‌خوردگی را حفظ کنند، ضروری به نظر می‌رسد [۱۷]. استفاده از قیر پلیمری می‌تواند راه‌حلی مناسب برای جبران کاهش مقاومت شیارشدگی ناشی از افزودن جوان‌کننده‌ها باشد [۱۸–۲۰].

در تحقیقاتی مانند مطالعه Ziari و همکاران (۲۰۲۲)، دونوع جوان‌کننده مختلف (روغن ضایعات پخت‌وپز و روغن موتور پسماند) با خرده‌لاستیک مخلوط‌شده و به مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد RAP اضافه شدند. نتایج نشان داد که جوان‌کننده‌های اصلاح‌شده با خرده لاستیک به‌طور قابل‌توجهی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌ها را افزایش داده‌اند

بدون آنکه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و حساسیت به رطوبت را کاهش دهند [۲۱]. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر توسط Song و همکاران (۲۰۱۸) نشان داده شد که جوان‌کننده‌ها می‌توانند مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود بخشند، اما ممکن است در مقاومت شیارشدگی مشکلاتی ایجاد کنند. آن‌ها همچنین تأثیر استفاده از فناوری‌های مخلوط گرم را در جبران این مشکلات نشان دادند [۲۰]. در این زمینه، تحقیقاتی همچون Bilema و همکاران (۲۰۲۲) و Eltwati و همکاران (۲۰۲۲) نیز به بررسی تأثیرات جوان‌کننده‌ها و افزودنی‌ها بر ویژگی‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAPپرداخته‌اند [۲۲, ۲۳].

امروزه، استفاده از جوان‌کننده‌های ارزان‌قیمت و دوستدار محیط‌زیست موردتوجه قرار گرفته است و استفاده از پلیمرهای بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP، به‌دلیل کاهش مصرف منابع طبیعی، کاهش هزینه‌ها و مدیریت پسماندهای پلاستیکی، به‌عنوان رویکردی همسو با توسعه پایدار شناخته می شود. در این پژوهش، به‌منظور بررسی تأثیر نوع و مقدار جوان‌کننده، از سه نوع جوان‌کننده با ماهیت شیمیایی متفاوت شامل روغن موتور ضایعاتی (گروه روغن‌های پارافینی)، اسیداولئیک (گروه اسیدهای چرب) و VB (گروه قیرپایه) در چهاردرصد مختلف استفاده شد. همچنین، پلی‌اتیلن بازیافتی سنگین (R-HDPE) در چهاردرصد مختلف، به‌صورت جداگانه و در ترکیب با هریک از جوان‌کننده‌ها، مورد استفاده قرار گرفت.

نوآوری این پژوهش در ارائه یک ارزیابی جامع از اثر هم‌زمان نوع و مقدار جوان‌کننده و پلیمر بازیافتی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که عمدتاً اثر جوان‌کننده‌ها یا پلیمرها را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند، در این تحقیق عملکرد سه خانواده مختلف جوان‌کننده با ماهیت‌های شیمیایی متفاوت، به‌صورت جداگانه و در ترکیب با پلی‌اتیلن بازیافتی، مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، اثر این افزودنی‌ها بر دو شاخص عملکردی مهم شامل مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و شیارشدگی به‌طور هم‌زمان بررسی شد تا امکان دستیابی به یک ترکیب متعادل با عملکرد مناسب در هر دو معیار فراهم شود. علاوه‌بر این، با توجه به استفاده هم‌زمان از RAP، جوان‌کننده و پلیمر بازیافتی، این پژوهش گامی در جهت توسعه مخلوط‌های آسفالتی پایدار با بهره‌گیری حداکثری از مواد بازیافتی و کاهش مصرف منابع اولیه محسوب می‌شود.

۲. مواد و روش‌شناسی

۲-۱ مواد

۲-۱-۱ قیر

قیر مورد استفاده در این تحقیق، قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ می‌باشد و از پالایشگاه نفت جی اصفهان تهیه شده است. جدول ۱ برخی از خصوصیات فیزیکی قیر استفاده شده در این تحقیق را نشان می دهد.

جدول ۱. مشخصات قیر استفاده شده

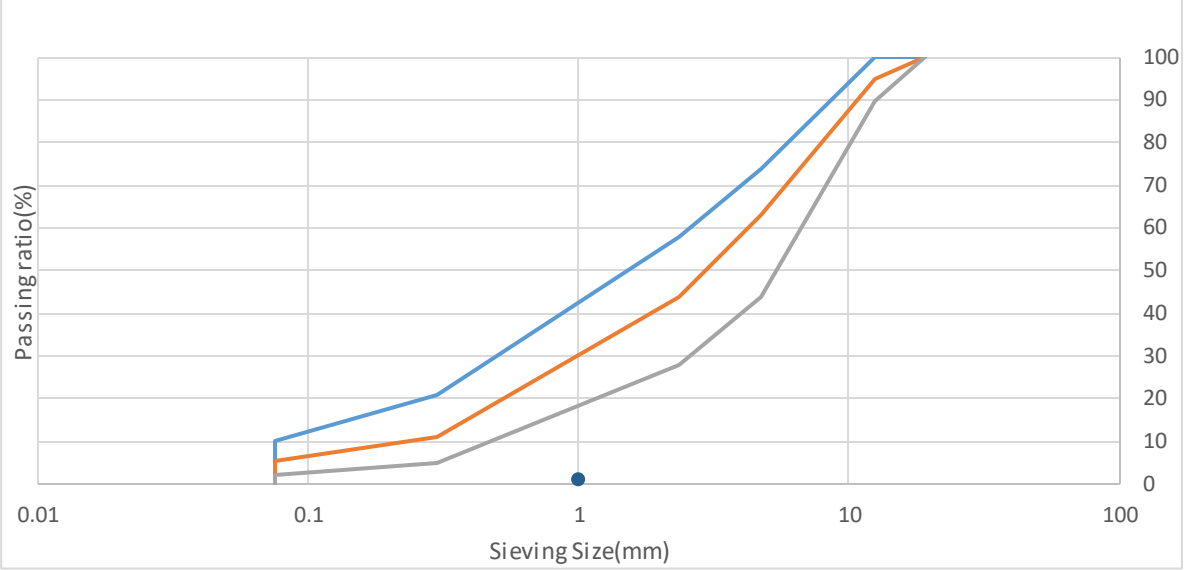
تست	شماره استاندارد	نتایج
Density (gr/cm^3)	ASTM-D70	**1.04**
Penetration 25 °C (0.1mm)	ASTM-D5	**66**
soft point (°C)	ASTM-D36	**50**
Flash point (°C)	ASTM-D3143	**312**
Viscosity 135^{0}C (Cst.)	ASTM-D2170	**329**
Ductility 25°C (Cm)	ASTM-D113	**100**

۲-۱-۲ سنگدانه بکر و RAP

نوع سنگدانه و درجه‌بندی آن ازجمله عوامل حیاتی در تعیین عملکرد مخلوط‌های آسفالتی به‌شمار می‌رود، چرا که سنگدانه‌ها در اکثر موارد حدود ۹۵ درصد از وزن مخلوط و بیش از ۸۰ درصد از حجم آن را تشکیل می‌دهند [۲۴]. در این تحقیق، از سنگدانه‌های آهکی به‌عنوان سنگدانه بکر استفاده شده است. تمامی مخلوط‌ها طبق منحنی میانی پیشنهادی استاندارد ASTM D3515 [۲۵] با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر درجه‌بندی شدند. مشخصات مصالح آهکی بکر مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ آمده است. همچنین، مصالح RAP استفاده‌شده در این پژوهش از یک آزادراه در شهر اصفهان با عمر ۱۰ ساله جمع‌آوری شد و جنس آن‌ها نیز آهکی بود. تمامی مخلوط‌ها براساس منحنی میانی ASTM D3515 دانه‌بندی شده‌اند. دانه‌بندی به‌کاررفته در این تحقیق در شکل ۱ نشان‌داده شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه استفاده شده

تست	شماره استاندارد	نتایج
Los Angeles abrasion test (%)	ASTM-C131	**23**
Moisture absorption (%)	ASTM-C128	**0.96**
Density (gr/cm^3)	ASTM-C127	**2.61**



شکل ۱. دانه‌بندی مخلوط آسفالتی مورد استفاده

۲-۱-۳ جوان‌ساز

استفاده از جوان‌سازها یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود عملکرد ترک‌خوردگی مصالح RAP در دماهای مختلف است. انتخاب نوع و میزان جوان‌ساز مصرفی در این زمینه اهمیت زیادی دارد. انتخاب جوان‌سازهای مورد استفاده در این پژوهش با هدف مقایسه عملکرد سه گروه مختلف از جوان‌سازها شامل جوان‌سازهای نفت‌پایه، روغن‌پایه و اسیدهای چرب انجام شد. این سه ماده به دلیل تفاوت در ماهیت شیمیایی، مکانیسم جوان‌سازی، دسترسی مناسب و کاربرد گسترده در مطالعات پیشین انتخاب شدند تا امکان مقایسه عملکرد آن‌ها در بهبود رفتار مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP فراهم شود. در این پژوهش، از سه نوع جوان‌ساز مختلف شامل اسیدهای چرب (اسید اولئیک)، روغن پارافین (روغن موتور ضایعاتی) و قیرپایه (VB) استفاده شد. جهت ارزیابی تأثیر هریک از این مواد، جوان‌سازها به چهار نسبت مختلف (۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) نسبت به وزن قیر پیرشده موجود در مخلوط‌های حاوی RAPاضافه شدند. درصدهای انتخاب‌شده براساس محدوده‌های متداول گزارش‌شده در مطالعات پیشین و همچنین نتایج مطالعات مقدماتی انتخاب شدند، به‌گونه‌ای که علاوه‌بر بررسی تأثیر مقادیر کم، امکان ارزیابی اثر افزایش میزان جوان‌ساز و تعیین محدوده بهینه مصرف نیز فراهم شود. در ادامه، به تشریح خصوصیات هرکدام از جوان‌سازهای مورد استفاده پرداخته خواهد شد.

۲-۱-۳-۱ روغن موتور ضایعاتی

روغن موتور ضایعاتی با توجه به خواص شیمیایی و فیزیکی منحصربه‌فرد، قیمت پایین و جنبه‌های زیست‌محیطی، امروزه توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۲۵]. این روغن در دسته روغن‌های پارافین قرار دارد. برای تهیه این جوان‌ساز، روغن موتور ضایعاتی از سه تعویض روغنی مختلف در سطح شهر اصفهان جمع‌آوری و سپس نمونه‌های جمع‌آوری‌شده باهم ترکیب شدند و به‌عنوان جوان‌ساز در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. روغن موتور ضایعاتی در چهار درصد مختلف (۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) نسبت به وزن قیر پیرشده موجود در RAP به مخلوط‌ها اضافه شد. مشخصات و ویژگی‌های فیزیکی روغن‌موتور ضایعاتی استفاده‌شده در این پژوهش در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی روغن موتور ضایعاتی استفاده شده

ویژگی	Viscosity @ 40°C (cP.s)	Flash point (°C)	Density @ 25°C (gr/cm^3)
روغن موتور ضایعاتی	102	221	0.8817

۲-۱-۳-۲ اسیداولئیک

اسیداولئیک از نظر شیمیایی به‌عنوان یک اسید چرب شناخته می‌شود. این ماده به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد. ازجمله مهم‌ترین کاربردهای

اسیداولئیک می‌توان به استفاده در صنایع نساجی، کشاورزی و آبکاری فلزات اشاره کرد. در این صنایع، اسیداولئیک نقش امولسیفایر و نرم‌کننده را ایفا می‌کند. در این پژوهش، اسیداولئیک در چهار درصد مختلف (۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) نسبت به وزن قیر پیرشده موجود در RAP به مخلوط‌ها اضافه شد. مشخصات و ویژگی‌های فیزیکی اسیداولئیک استفاده شده در این تحقیق در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ٤. مشخصات اسیداولئیک استفاده شده

تست	نتایج	واحد	استاندارد
Appearance @ 25˚C	Clear liquid	-	-
Density @ 25˚C	0.98±0.02	gr/cm3	-
pH (5% in water)	5-7	-	ASTM E70
Cloud point (10% in 25%BDG)	59-63	˚C	ASTM D2024
Hydroxyl Value	100 - 108	mg KOH/g	USP37-NF32
Saponification value	95-105	mg KOH/g	USP37-NF32
Water	Max. 0.5	%Wt	ASTM E203

۲-۱-۳-۳ قیر VB

پسماند برج تقطیر در خلأ (VB)، به‌دلیل خواص مشابه آن با قیر، ارزان‌بودن و دردسترس‌بودن، به‌عنوان جوان‌ساز قیر پیرشده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. قیر VB استفاده شده در این پژوهش از پالایشگاه نفت جی اصفهان تهیه گردید. این قیر در چهار درصد مختلف (۰٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪) نسبت به وزن قیر پیرشده موجود در RAP به مخلوط‌ها اضافه شد. مشخصات فیزیکی این ماده در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. مشخصات فیزیکی VB استفاده شده

ویژگی		نتایج
ویسکوزیته کینماتیکی(.Cst)	60 (°C)	19570
	80 (°C)	2251
	100 (°C)	559
	135 (°C)	106
درجه نفوذ (0.1mm) @(°C) 25		409
چگالی (gr/cm3)		1.008

۲-۱-٤ پلی‌اتیلن بازیافتی با چگالی سنگین (R-HDPE)

امروزه با توجه به رشد جمعیت و گسترش صنایع، زباله‌های با پایه پلیمری و پلاستیکی به‌میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است. اضافه کردن زباله‌های صنعتی و شهری به روسازی‌های آسفالتی، به‌عنوان یک راهکار مناسب برای مدیریت پسماند و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی مطرح شده است. به‌طوری که زباله‌های صنعتی و شهری امروزه توجه فزاینده‌ای را در کشورهای مختلف سراسر جهان جلب کرده است. در میان زباله‌های مختلف، پلاستیک‌های بازیافتی شامل PET، پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP) و پلی‌استایرن (PS) به شمار می‌روند. PET و PE به‌دلیل فراوانی و ارزان‌بودن، بیشترین توجه را به خود جلب کرده‌اند [۲۶]. در این پژوهش از پلی‌اتیلن بازیافتی سنگین (R-HDPE) در چهار درصد مختلف (۰٪، ۳٪، ۵٪ و ۷٪) نسبت به وزن قیر بکر استفاده شد. این مواد دارای زنجیره طولانی از اتم‌های کربن هستند که به هر اتم کربن، دو اتم هیدروژن متصل شده است. مشخصات فیزیکی پلی‌اتیلن بازیافتی استفاده شده در این تحقیق در جدول ۶ ارائه شده است.

پلی‌اتیلن بازیافتی سنگین به‌دلیل فراوانی، قیمت مناسب، پایداری حرارتی مطلوب و عملکرد مناسب در بهبود مقاومت شیارشدگی، به‌عنوان پلیمر اصلاح‌کننده انتخاب شد. همچنین، مقادیر ۳، ۵ و ۷ درصد براساس دامنه رایج مورد استفاده در مطالعات پیشین انتخاب شدند تا ضمن جلوگیری از افزایش بیش‌ازحد ویسکوزیته، امکان بررسی اثر افزایش مقدار پلیمر بر عملکرد مخلوط فراهم شود.

جدول ٦. مشخصات پلی اتیلن بازیافتی با چگالی سنگین

تست	نتایج	استاندار
(190, 5) g/10min Melt flow index	0.47	ASTM D1238
(190, 2.16) g/10min Melt flow index	0.083	ASTM D1238
Density (g/cm3)	0.95	ASTM D792
Vicat softening point (°C)	64.5	ISO 306
Melting temperature (°C)	142.8	ISO 113571

۲-۲ روش‌شناسی

۲-۲-۱ طراحی مخلوط و تهیه نمونه‌ها

در این پژوهش، ابتدا مصالح RAP و مصالح سنگی بکر به‌صورت جداگانه تا دمای اختلاط گرم شدند. سپس جوان‌ساز مستقیماً به مصالح RAP افزوده شد و به مدت چنددقیقه تا دستیابی به پوشش یکنواخت مخلوط شد تا توزیع یکنواخت جوان‌ساز در مصالح RAP حاصل شود. در مرحله بعد، مصالح RAP جوان‌شده با مخلوط آسفالتی تازه که قیر آن از قبل با پلیمر بازیافتی اصلاح شده بود، ترکیب شدند و فرایند اختلاط تا دستیابی به یک مخلوط یکنواخت ادامه یافت. انتخاب این روش اختلاط با هدف شبیه‌سازی شرایط واقعی تولید مخلوط‌های بازیافتی در کارخانه‌های آسفالت انجام شد [۲۷]. مخلوط‌های ترکیب‌شده با استفاده از چکش اتوماتیک مارشال و مطابق با استاندارد ASTM-D1559 ساخته شدند. درصد بهینه قیر مطابق روش طراحی مخلوط مارشال و براساس استاندارد AASHTO T245 تعیین شد. برای این‌منظور، نمونه‌هایی با درصدهای مختلف قیر تهیه و شاخص‌های پایداری مارشال، روانی، درصد فضای خالی، فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و فضای خالی پرشده با قیر (VFA) محاسبه شدند. درنهایت، درصد قیر بهینه با درنظرگرفتن هم‌زمان الزامات آیین‌نامه‌ای و برقراری معیارهای طراحی مارشال برابر 5.3 درصد تعیین شد. در جدول ۷ نام نمونه‌ها همراه با ترکیبات آن‌ها ذکر شده است.

برای تهیه نمونه‌های نیم‌دیسک SCB، از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱±۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲±۶۰ میلی‌متر استفاده شد. سپس نمونه‌های استوانه‌ای به نمونه‌های نیم‌دیسک با ضخامت ۳۰ میلی‌متر توسط دستگاه واترجت برش داده شدند. در ادامه، ناچ با طول ۱۰ میلی‌متر و عرض ۲ میلی‌متر در نمونه‌ها ایجاد شد [۲۷].

در این پژوهش، ۲۴ نوع ترکیب مختلف شامل مصالح و افزودنی‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. به‌طوری که سه ترکیب مختلف که شامل ۱۰۰٪ مصالح تازه، ۵۰٪ مصالح تازه + 50% RAP و 100% RAP بدون افزودنی بودند به‌عنوان مخلوط‌های کنترل در نظر گرفته شدند. در سایر مخلوط‌ها، درصد مصالح سنگی و RAP ثابت بودند و هرکدام ۵۰٪ از نمونه‌ها را تشکیل می‌دادند، با این حال نوع جوان‌ساز، مقدار جوان‌ساز و مقدار پلیمر بازیافتی استفاده‌شده به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شد.

جدول ۷. مشخصات نمونه‌های ساخته شده

	نام اختصاری	مصالح بکر آهکی (٪)	RAP(٪)	WEO (%)	OA (%)	VB (%)	R-HDPE (%)
1	R100	0	100	0	0	0	0
2	L100	100	0	0	0	0	0
3	RL	50	50	0	0	0	0
4	RLE5	50	50	5	0	0	0
5	RLE10	50	50	10	0	0	0
6	RLE15	50	50	15	0	0	0
7	RLO5	50	50	0	5	0	0
8	RLO10	50	50	0	10	0	0
9	RLO15	50	50	0	15	0	0
10	RLV10	50	50	0	0	10	0
11	RLV15	50	50	0	0	15	0
12	RVL20	50	50	0	0	20	0
13	RLP3	50	50	0	0	0	3

	نام اختصاری	مصالح بکر آهکی (٪)	RAP(٪)	WEO (%)	OA (%)	VB (%)	R-HDPE (%)
14	RLP5	50	50	0	0	0	5
15	RLP7	50	50	0	0	0	7
16	RLE5P3	50	50	5	0	0	3
17	RLE10P5	50	50	10	0	0	5
18	RLE15P7	50	50	15	0	0	7
19	RLO5P3	50	50	0	5	0	3
20	RLO10P5	50	50	0	10	0	5
21	RLO15P7	50	50	0	15	0	7
22	RLV10P3	50	50	0	0	10	3
23	RLV15P5	50	50	0	0	15	5
24	RLV20P7	50	50	0	0	20	7

۲-۲-۲ آزمایش خمش نیم‌دایره (SCB)

در این پژوهش، آزمایش SCB در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و تحت شکست مود I انجام شد. این آزمایش با استفاده از دستگاه جهانیUTM-25 انجام گرفت. به‌منظور انجام آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در این دما نگهداری شدند. سپس فاصله تکیه‌گاه‌ها بر روی ۸۰ میلی‌متر تنظیم شد و نرخ بارگذاری دستگاه روی ۳ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفت. برای هر حالت از بارگذاری، ۳ نمونه آزمایشی ساخته شد و مورد بررسی قرار گرفتند [۲۷].

شروع و گسترش ترک‌ها، دو فاز اصلی در مکانیزم ترک هستند که به‌طور مستقیم بر یکپارچگی ساختاری روسازی‌های آسفالتی در حین بهره‌برداری تأثیر می‌گذارند. توصیف مناسب ویژگی‌های ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در مرحله طراحی مخلوط می‌تواند به‌طور چشمگیری رشد و انتشار ترک‌ها را کاهش دهد و طول عمر سرویس روسازی را افزایش دهد. به همین‌دلیل، برای تجزیه‌وتحلیل و بررسی رشد و انتشار ترک‌ها، چندین شاخص ترک‌خوردگی محاسبه شد، ازجمله چقرمگی شکست، انرژی شکست قبل از بار ماکزیمم و انرژی شکست بعد از بار ماکزیمم.

۲-۲-۲-۱ چقرمگی شکست

چقرمگی شکست مود I (KIC) به‌عنوان معیاری برای مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شکست تعریف می‌شود. چقرمگی شکست یک ویژگی مکانیکی است که نشان‌دهنده مقاومت ماده در برابر انتشار ترک‌ها در حضور ترک است. اصول اولیه محاسبه چقرمگی شکست براساس مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) بود. ترک‌ها زمانی رخ می‌دهند که ضریب شدت تنش به مقدار بحرانی، که همان چقرمگی شکست است، برسد. بنابراین، چقرمگی شکست حداکثر مقدار ضریب شدت تنش است که در آن ترک ایجاد می‌شود [۲۷].

چقرمگی شکست براساس کار Lim و همکاران محاسبه شد. در مطالعات قبلی، نویسندگان از نظریه ضریب شدت تنش صفحه برای آزمایش سنگ با استفاده از هندسه نمونه شیاردار SCB استفاده کردند. هدف از معرفی این بریدگی، هدایت توسعه ترک و فراهم‌آوردن ضعیف‌ترین نقطه در نوک ترک است که تنش را تحت بارگذاری متمرکز می‌کند [۲۷, ۲۸]. این کار بعدها در مطالعات ترک‌خوردگی بتن آسفالتی با استفاده از هندسه SCB مورد استفاده قرار گرفت [۲۸, ۲۹]. در این مطالعه، شکست مود I درنظرگرفته شده است. چقرمگی شکست در مودI (KI) با استفاده از معادله ۱ به‌دست آمد [۳۰].

$$K_1 = \sigma_{max} Y_1 \sqrt{\pi a} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{2rt}$$

$$Y_1 = 4.782 - 1.219\left(\frac{a}{r}\right) + 0.063\exp\left(7.045\left(\frac{a}{r}\right)\right)$$

K_I = چقرمگی شکست مود I بر حسب $N/mm^{1.5}$

σ_{max} = تنش ماکزیمم برحسب N/mm^2

P_{max} = نیروی ماکزیمم برحسب N

a = طول ناچ برحسب میلی‌متر

r = شعاع نمونه برحسب میلی‌متر

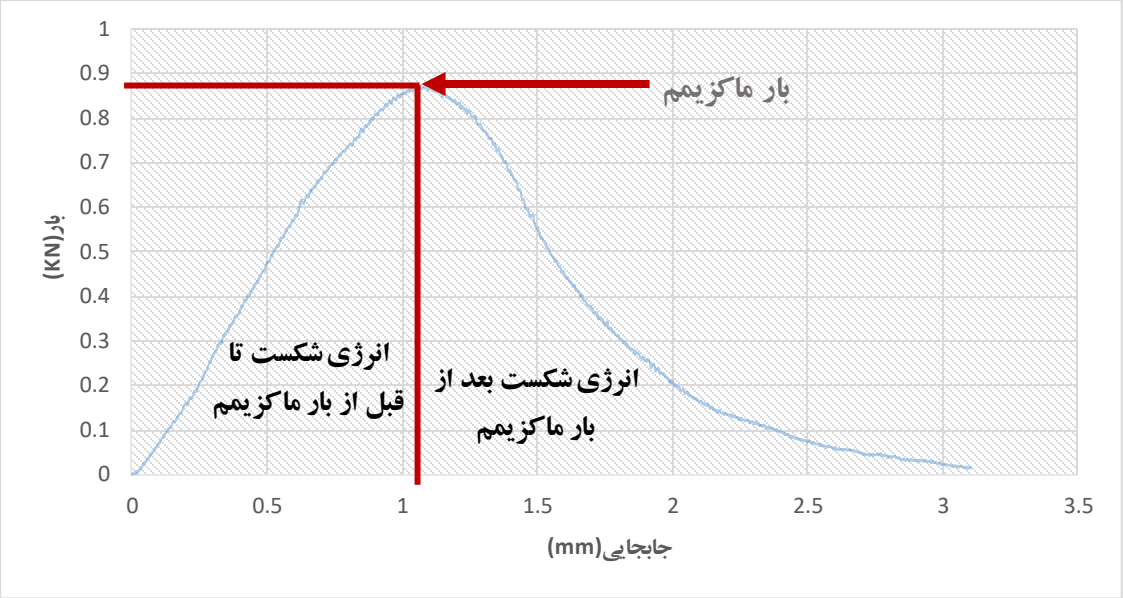
t = ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر

Y_1 = فاکتور شکل

۲-۲-۲-۲ انرژی شکست

انرژی شکست (Gf) به‌عنوان معیاری مهم برای مقایسه عملکرد ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته می‌شود. با این حال، ممکن است دو مخلوط که مقادیر مشابهی از Gf دارند، رفتار ترک‌خوردگی متفاوتی از خود نشان دهند [۲۸]. بنابراین، در این تحقیق، انرژی شکست به دو بخش قبل و بعد از بار ماکزیمم تقسیم

شد. انرژی‌های شکست قبل و بعد از بار ماکزیمم، که به‌ترتیب به‌عنوان انرژی شکست ذخیره‌شده و انرژی شکست باقی‌مانده شناخته می‌شوند، به‌عنوان معیاری برای بررسی مقاومت مواد در برابر آغاز ترک و گسترش آن نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۸]. انرژی شکست ذخیره‌شده و باقی‌مانده به‌عنوان سطح زیر منحنی بار-جابجایی قبل و بعد از بار ماکزیمم محاسبه می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲. منحنی بار-جابه‌جایی و نمای شماتیک آن

۲-۲-۳ تست شیارشدگی (Wheel Track Test)

شیارشدگی به‌عنوان یکی از مشکلات مهم در روسازی‌های آسفالتی، سال‌هاست که موردتوجه قرار گرفته است [۲۵]. در این مطالعه، از تست چرخ شیار هامبورگ (HWTT) به‌منظور ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی و مطابق با استاندارد AASHTO T324-17 استفاده شد. برای این آزمایش از دو نمونه استوانه‌ای مجاور یکدیگر استفاده گردید [۲۶]. نمونه‌های استوانه‌ای به‌دلیل سهولت در آماده‌سازی نسبت به نمونه‌های تیرشکل، معمولاً ترجیح داده می‌شوند. ابتدا، نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در محفظه‌ای نگهداری شدند. سپس دو نمونه استوانه‌ای در قالب‌های پلاستیکی ثابت شدند. پس از آن، عمق شیار پس از ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری و تحت نیروی 705 ± 4 N و سرعت عبور ۰/۳۰۵ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد [۳۱]. همچنین، چرخ شیار با قطر ۲۰۳ میلی‌متر و عرض ۴۷ میلی‌متر بود [۳۲].

۳. نتایج

۱-۳ تست شیارشدگی

نتایج تست شیارشدگی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان RAP، عمق شیارشدگی کاهش یافته است. به‌عبارت دیگر، مخلوط‌های حاوی RAP نسبت به مخلوط بدون RAP در برابر تغییر شکل دائمی مقاوم‌تر بودند [۵]. این نتایج به‌دلیل سفتی بالاتر قیر قدیمی در RAPنسبت داده می‌شود. قیر پیرشده موجود در RAP ساختار کلوئیدی سفت‌تری نسبت به قیر بکر دارد [۳۳]، بنابراین قیر پیرشده تأثیر مثبتی بر مقاومت شیارشدگی قیرهای آسفالت داشت [۵]. به‌طوری که هرچه مقدار RAP بیشتر شود، عمق شیارشدگی نیز کاهش می‌یابد [۳۴]. نتایج نشان دادند که عمق شیارشدگی نمونه R100، ۴۰٪ کمتر از عمق شیارشدگی نمونه L100 است.

نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که افزایش درصد RAP، به‌دلیل حضور قیر پیرشده با مدول بالاتر و ویسکوزیته بیشتر، مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر تغییرشکل دائمی افزایش می‌دهد و عمق شیارشدگی را کاهش می‌دهد [۳۵]. با این حال، اگرچه افزایش مقدار RAP عملکرد دمای بالای مخلوط را بهبود می‌بخشد، اما معمولاً باعث افزایش شکنندگی و کاهش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی نیز می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که بهبود مقاومت شیارشدگی و مقاومت ترک‌خوردگی در مخلوط‌های حاوی RAP معمولاً با یک رابطه مبادله‌ای[1] همراه است که استفاده از جوان‌سازها را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد [۳۶و۳۸].

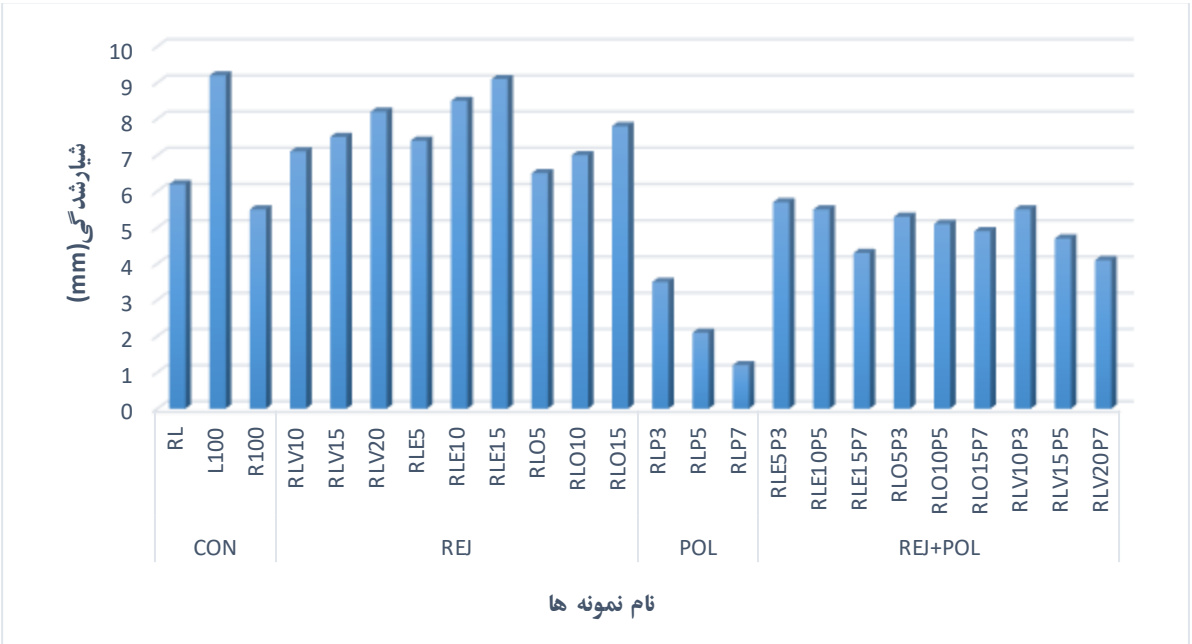
1. Trade-off

در ادامه، افزودن جوان‌سازها موجب کاهش عملکرد شیارشدگی و افزایش عمق شیارشدگی شد. افزودن جوان‌سازها درجه نفوذ و شکل‌پذیری آسفالت را افزایش داده و نقطه نرمی و ویسکوزیته را کاهش دادند [۳۹]. همچنین در درصد بالاتر از جوان‌سازها، اثر روان‌کنندگی بر روی سنگ‌دانه‌ها افزایش می‌یابد که موجب می‌شود هم‌بستگی سنگدانه‌ها قطع شده و عمق شیارشدگی افزایش یابد [۲۴, ۳۹]. در ادامه، افزودن پلیمر بازیافتی به‌طور چشمگیری عمق شیارشدگی را کاهش داد. به‌طوری که افزودن ۷٪ پلیمر بازیافتی عمق شیارشدگی را نسبت به مخلوط کنترل (RL) به‌میزان ۸۰٪ کاهش داد. پلیمر بازیافتی باعث کاهش نفوذ و افزایش نقطه نرمی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود، به‌طوری که مخلوط‌های اصلاح‌شده دارای سفتی بالاتر و حساسیت دمایی کمتری دارند. همچنین پلی‌اتیلن بازیافتی باعث افزایش چسبندگی و هم‌بستگی بین قیر آسفالت و سنگدانه‌ها می‌شود. به همین‌دلیل، استفاده از پلیمر ضایعاتی باعث افزایش مقاومت شیارشدگی می‌شود [۳۸, ۴۰].

این روند با نتایج مطالعات قبلی نیز مطابقت دارد. تحقیقات متعددی گزارش کرده‌اند که اگرچه جوان‌سازها با بازیابی بخشی از اجزای سبک قیر پیرشده و کاهش ویسکوزیته آن، انعطاف‌پذیری مخلوط را افزایش می‌دهند، اما کاهش سختی قیر می‌تواند مقاومت در برابر شیارشدگی را نیز کاهش دهد. در واقع، عملکرد جوان‌سازها همواره نیازمند ایجاد تعادل بین بهبود مقاومت ترک‌خوردگی و حفظ مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی است [۳۵-۳۷].

درنهایت، افزودن ترکیب جوان‌ساز و پلیمر باعث افزایش عمق شیارشدگی نسبت به نمونه‌های فقط حاوی پلیمر شد. با این حال، عمق شیارشدگی نسبت به مخلوط کنترل (RL) و نمونه‌های فقط حاوی جوان‌ساز کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که افزودن پلیمر بازیافتی و جوان‌ساز ترکیب مناسبی برای جبران ضعف مقاومت شیارشدگی ناشی از حضور جوان‌ساز است. از نظر اولویت‌بندی، مخلوط حاوی فقط پلیمر بالاترین مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی را داشت. سپس مخلوط حاوی 100% RAP، مخلوط‌های حاوی ترکیب جوان‌ساز و پلیمر، نمونه حاوی50% RAP+50% virgin، نمونه‌های حاوی فقط جوان‌ساز و درنهایت نمونه حاوی ۱۰۰٪ مصالح تازه به‌ترتیب در رده‌های بعدی قرار گرفتند.

این نتایج با مطالعات انجام‌شده بر روی پلیمرهای بازیافتی نیز همخوانی دارد. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که پلی‌اتیلن بازیافتی با افزایش مدول و کاهش حساسیت دمایی قیر، مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر تغییرشکل دائمی بهبود می‌بخشد. علاوه‌بر این، حضور پلیمر موجب ایجاد یک فاز تقویت‌کننده در ماستیک آسفالتی شده و انتقال تنش بین قیر و سنگدانه‌ها را بهبود می‌بخشد که درنهایت منجر به کاهش عمق شیارشدگی می‌شود [۴۱].



شکل ۳. نتایج تست شیارشدگی

۳-۲ چقرمگی شکست

نتایج مقدار چقرمگی شکست در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش مقدار RAP، مقدار چقرمگی شکست افزایش چشمگیری داشته است. به‌طوری که نمونه حاوی 100% RAP دارای ۷۰٪ چقرمگی شکست بیشتری نسبت به مخلوط حاوی ۱۰۰٪ مصالح تازه است. همچنین نمونه حاوی ۵۰٪ مصالح تازه به‌علاوه 50% RAP نیز ۱۹٪ چقرمگی بیشتری نسبت به مخلوط بدون RAP داشت. دلیل این امر این است که چقرمگی شکست بسیار وابسته به بار ماکزیمم می‌باشد. به‌این‌ترتیب نمونه‌های حاوی درصد بیشتری از RAP، قیر پیر شده و سخت شده‌ی بیشتری دارند که این امر باعث افزایش بار ماکزیمم در نمونه‌ها و به‌تبع آن، افزایش چقرمگی شکست نمونه‌ها گشته است [۴۲, ۴۳].

افزایش چقرمگی شکست با افزایش درصد RAP با نتایج برخی مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد. پژوهشگران گزارش کرده‌اند که حضور قیر پیرشده، به‌دلیل افزایش سختی و مقاومت در برابر تغییرشکل، موجب افزایش بار بیشینه و درنتیجه افزایش چقرمگی شکست می‌شود. با این حال، در بسیاری از مطالعات تأکید شده است که افزایش چقرمگی الزاماً به‌معنای بهبود مقاومت ترک‌خوردگی نیست، زیرا افزایش سختی معمولاً با کاهش شکل‌پذیری و افزایش احتمال شکست ترد همراه است [۳۶, ۳۷].

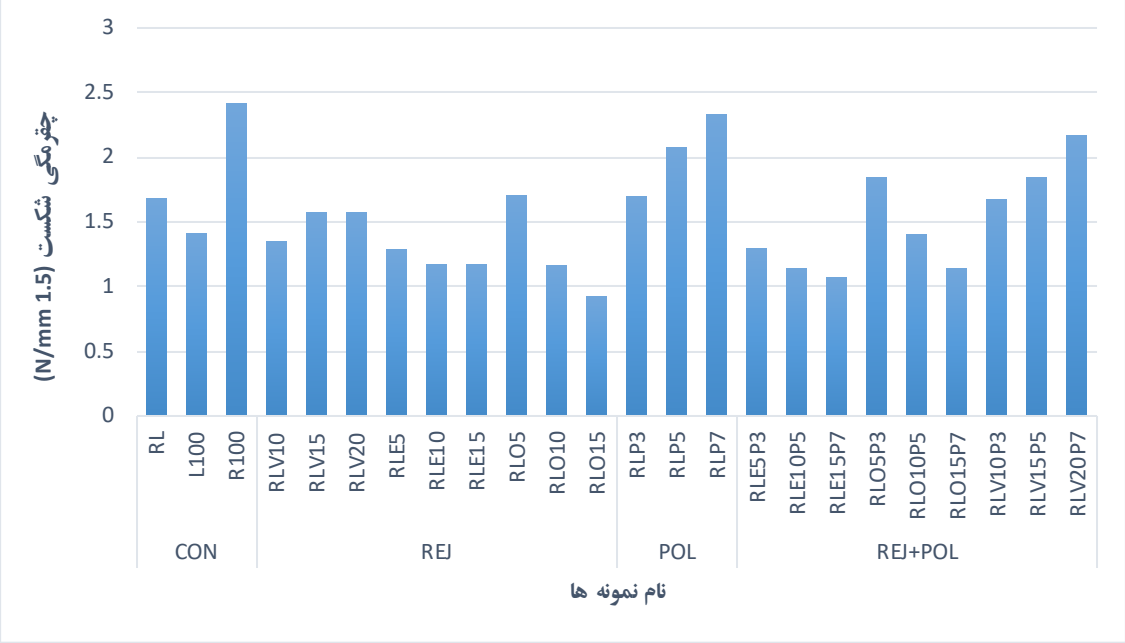
با افزودن جوان‌ساز، مقدار چقرمگی شکست کاهش پیدا کرده است. دلیل این امر نرم‌شدن قیر پیرشده موجود در اثر افزودن جوان‌ساز می‌باشد. همچنین همان‌طور که مشخص است، با افزایش درصد روغن موتور ضایعاتی و اسیداولئیک، مقدار چقرمگی شکست به‌دلیل نرم‌شدن بیشتر، کاهش پیدا می‌کند. با این وجود، در هنگام افزایش مقدار قیرVB، مقدار چقرمگی شکست افزایش پیدا کرده است. دلیل این امر می‌تواند بهبود چسبندگی میان قیر پیرشده و قیر تازه با افزایش مقدار VB در این دما باشد. این افزایش چسبندگی باعث افزایش نیروی ماکزیمم تحمل‌شده توسط نمونه و درنتیجه افزایش چقرمگی شکست گشته است [۴۴].

این نتایج با گزارش‌های منتشرشده در زمینه عملکرد جوان‌سازها نیز مطابقت دارد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که جوان‌سازها با بازیابی تعادل بین آسفالتن‌ها و مالتن‌ها، سختی قیر پیرشده را کاهش داده و انعطاف‌پذیری آن را افزایش می‌دهند. درنتیجه، هرچند ظرفیت تغییرشکل مخلوط افزایش می‌یابد، اما کاهش بار بیشینه می‌تواند باعث کاهش چقرمگی شکست شود. این رفتار به‌ویژه در جوان‌سازهایی که اثر نرم‌کنندگی بیشتری دارند، بیشتر مشاهده می‌شود[۳۷].

با اضافه‌کردن پلیمر، مقدار چقرمگی شکست افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. به‌طوری که افزودن ۷٪ پلیمر، چقرمگی شکست را نسبت به مخلوط کنترل ۳۹٪ افزایش داده است. افزودن پلیمر به مخلوط آسفالتی باعث سفت‌شدن قیر مخلوط گشته و باعث افزایش بار ماکزیمم‌شده که درنتیجه، افزایش چقرمگی شکست را درپی خواهد داشت [۴۲]. در ادامه، با افزودن روغن موتور ضایعاتی، همان‌طور که مشخص است، مقدار چقرمگی شکست کاهش پیدا کرده است. این امر می‌تواند به‌دلیل نرمی بیشتر مخلوط و کاهش مقاومت آن باشد.

سپس، همان‌طور که مشخص است، افزودن ۵٪ اسیداولئیک باعث افزایش ۱۰٪ چقرمگی شکست نسبت به نمونه کنترل گشته است. این امر به‌دلیل ایجاد چسبندگی جزئی با ۵٪ اسیداولئیک در میان قیر پیرشده و قیر پلیمری با مصالح سنگدانه‌ای است. در ادامه، همان‌طور که مشخص است، افزایش مقدار اسیداولئیک باعث نرم شدن بیشتر گشته است که درنتیجه مقادیر چقرمگی شکست نیز کاهش پیدا کرده است. درنهایت، افزودن قیر VB و پلیمر باعث افزایش چسبندگی در میان قیر پیرشده و قیر تازه گشته است. همان‌طور که از نتایج نیز مشخص است، این امر باعث افزایش نیروی بحرانی و چقرمگی شکست گشته است.

به‌طور خاص، مخلوط‌هایی با محتوای RAP بالاتر و یا قیر پلیمری با درصد بالای پلیمر منجر به مخلوط‌های آسفالتی با سفتی بالاتر می‌شود. این به این‌دلیل است که مخلوط‌های با محتوای RAP و پلیمر بالاتر، بسیار سفت‌تر از قیر خالص است و مخلوط قیر قدیمی و قیر پلیمری منجر به مخلوط سفت‌تر از قیر خالص می‌شود.



شکل ٤. نتایج چقرمگی شکست

۳-۳ نتایج انرژی شکست تا قبل از بار ماکزیمم

نتایج انرژی شکست تا بار ماکزیمم در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش مقدار RAP ، مقدار انرژی شکست تا بار ماکزیمم کمی افزایش پیدا کرده است. زیرا در این حالت و قبل از بار ماکزیمم، نمونه‌های سفت‌تر مقاومت بیشتری در برابر شروع ترک دارند و بنابراین مساحت زیر نمودار بار-جابجایی بیشتر می‌شود. نمونه‌های حاوی پلیمر نیز به‌دلیل سفتی بیشتر نمونه‌ها، انرژی شکست تا بار ماکزیمم بیشتری نسبت به نمونه کنترل دارند.

نتایج نشان داد که با افزودن VB، انرژی شکست تا قبل از بار بیشینه افزایش یافت. این رفتار را می‌توان به افزایش چسبندگی ماستیک آسفالتی و بهبود میزان فعال شدن قیر پیرشده موجود در RAP نسبت داد. در واقع، VB با افزایش قابلیت اختلاط بین قیر پیرشده و قیر تازه، موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش در ساختار مخلوط شده و ظرفیت باربری نمونه را افزایش می‌دهد.

در مقابل، افزایش مقدار روغن موتور ضایعاتی و اسید اولئیک، به‌ویژه در مقادیر بالاتر، موجب کاهش انرژی شکست تا قبل از بار بیشینه شد. این رفتار احتمالاً ناشی از کاهش بیش از حد ویسکوزیته و سختی مؤثر ماستیک آسفالتی است. اگرچه این جوان‌سازها انعطاف‌پذیری مخلوط را افزایش می‌دهند، اما نرم‌شدگی بیش از حد قیر موجب کاهش ظرفیت تحمل بار قبل از شروع گسترش ترک می‌شود. بنابراین، افزایش جابه‌جایی نمونه قادر به جبران کاهش ظرفیت باربری نبوده و درنهایت انرژی شکست تا قبل از بار بیشینه کاهش می‌یابد [۲۸].

در میان نمونه‌های ترکیبی، استفاده هم‌زمان از VB و پلیمر بهترین عملکرد را نشان داد. این موضوع بیانگر وجود یک اثر هم‌افزایی بین این دو افزودنی است؛ به‌طوری‌که VB با افزایش چسبندگی و بازیابی خواص قیر پیرشده، قابلیت انتقال تنش را بهبود می‌بخشد، درحالی‌که پلیمر با افزایش سختی و خاصیت ویسکوالاستیک ماستیک، مقاومت مخلوط را در برابر تمرکز تنش و شروع ترک افزایش می‌دهد. درنتیجه، ترکیب این دو افزودنی موجب افزایش ظرفیت جذب انرژی پیش از رسیدن به بار بیشینه می‌شود.



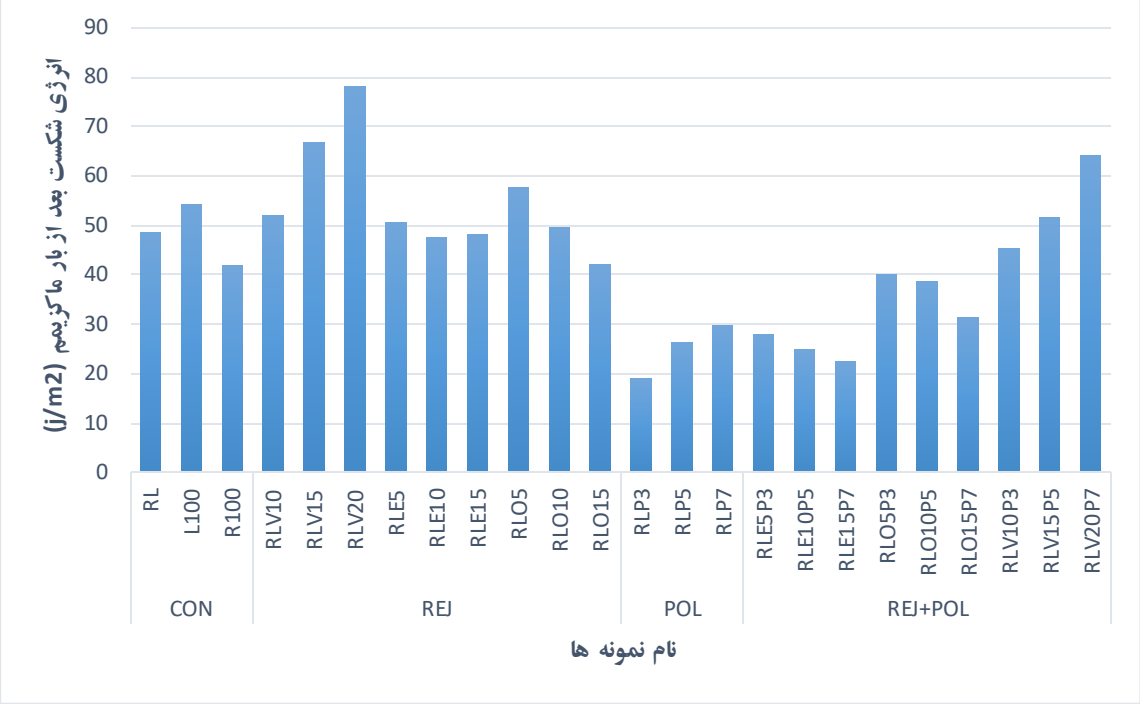
شکل ۵. انرژی شکست تا قبل از بار ماکزیمم

۴-۳ نتایج انرژی شکست بعد از بار ماکزیمم

نتایج انرژی شکست بعد از بار ماکزیمم در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش RAP، مقدار انرژی شکست بعد از بار ماکزیمم کاهش می‌یابد. زیرا افزایش RAP باعث کاهش چسبندگی ماستیک آسفالت شده و تردشدن نمونه‌ها را در پی دارد. در این حالت مقاومت در برابر انتشار ترک کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که نمونه با سرعت بیشتری دچار شکست می‌شود و مقدار جابه‌جایی کمتری تا لحظه شکست دارد. نمونه‌های حاوی فقط پلیمر نیز چنین رفتاری دارند. به‌طوری‌که افزودن پلیمر باعث سفتی و تردشدن نمونه‌ها شده و بعد از بار ماکزیمم، انتشار ترک با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد.

در ادامه، افزودن روغن موتور ضایعاتی و اسید اولئیک تغییر چشمگیری نسبت به مخلوط کنترل در انرژی شکست پس از بار ماکزیمم ایجاد نکرد. با این حال، استفاده از VB موجب افزایش قابل‌توجه این پارامتر شد؛ به‌طوری‌که مقدار انرژی شکست پس از بار ماکزیمم در نمونه RLV20 نسبت به نمونه L100 حدود ۴۵ درصد افزایش یافت. از آنجا که انرژی شکست پس از بار بیشینه عمدتاً به مقاومت مخلوط در برابر گسترش ترک وابسته است، این افزایش را می‌توان به بهبود چسبندگی بین قیر پیرشده و سنگدانه‌ها و همچنین افزایش انسجام ماستیک آسفالتی نسبت داد. جوان‌ساز VB با بازیابی بخشی از اجزای سبک از دست‌رفته قیر پیرشده و افزایش تحرک مولکول‌های قیر، موجب بهبود توزیع تنش در اطراف نوک ترک شده و درنتیجه سرعت انتشار ترک را کاهش می‌دهد. بنابراین، نمونه قادر است پیش از شکست نهایی، تغییرشکل بیشتری را تحمل‌کرده و انرژی بیشتری را جذب کند [۲۸].

در نمونه‌های حاوی پلیمر، افزودن روغن موتور ضایعاتی تأثیر محسوسی بر انرژی شکست پس از بار ماکزیمم نداشت، در حالی که اسیداولئیک و به‌ویژه VB باعث افزایش این شاخص شدند. این رفتار را می‌توان ناشی از عملکرد مکمل جوان‌ساز و پلیمر دانست؛ به‌گونه‌ای که جوان‌ساز با بهبود انعطاف‌پذیری و بازیابی بخشی از خواص قیر پیرشده، تمرکز تنش را کاهش می‌دهد و پلیمر نیز با ایجاد یک ساختار تقویت‌کننده در ماستیک آسفالتی، انسجام داخلی مخلوط را حفظ می‌کند. برهم‌کنش این دو مکانیزم موجب می‌شود ترک‌ها با سرعت کمتری گسترش‌یافته و مقاومت مخلوط در مرحله پس از بار بیشینه افزایش یابد [۲۸].



شکل ٦. انرژی شکست بعد از بار ماکزیمم

٤. آنالیز آماری

به‌منظور ارزیابی معنی‌داربودن تفاوت‌های مشاهده‌شده بین گروه‌های مختلف، تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. در این پژوهش، آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه[1] در سطح اطمینان 95 درصد و با سطح معنی‌داری $\alpha=0.05$ به‌کار گرفته شد [۴۵-۴۷]. در این تحلیل، متغیرهای مستقل شامل مقدار جوان‌ساز، نوع جوان‌ساز، مقدار ترکیب جوان‌ساز و پلیمر، و نوع ترکیب جوان‌ساز و پلیمر بودند. همچنین، متغیرهای وابسته شامل انرژی شکست قبل از بار ماکزیمم، انرژی شکست پس از بار ماکزیمم، چقرمگی شکست و مقاومت شیارشدگی بودند.

نتایج تحلیل آماری در جدول ۸ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است نتایج نشان داد که مقدار جوان‌ساز اثر معنی‌داری بر انرژی شکست پس از بار بیشینه و مقاومت شیارشدگی دارد، زیرا مقدار P-value برای این دو پارامتر کمتر از 0.05 بود. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر میزان جوان‌ساز می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر رفتار ترک‌خوردگی پس از شروع انتشار ترک و همچنین عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر تغییرشکل‌های دائمی در دماهای بالا تأثیر بگذارد. از سوی دیگر، برای انرژی شکست قبل از بار ماکزیمم و چقرمگی شکست، اختلاف بین مقادیر حاصل از درصدهای مختلف جوان‌ساز از نظر آماری معنی‌دار نبود(P-value > 0.05)، که بیانگر آن است که تغییر مقدار جوان‌ساز در محدوده مورد بررسی، تأثیر قابل توجهی بر این شاخص‌ها نداشته است.

جدول ۸ نتایج تحلیل واریانس یک‌طرفه جهت ارزیابی معنی‌داری اثر عوامل مؤثر بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی

شاخص آماری	مقدار جوان‌ساز		نوع جوان‌ساز		مقدار ترکیب جوان‌ساز + پلیمر		نوع ترکیب جوان‌ساز + پلیمر	
	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
انرژی شکست تا قبل از بار ماکزیمم	1.482	0.321	3.609	0.099	3.708	0.080	1.585	0.281
انرژی شکست بعد از بار ماکزیمم	**4.993**	**0.049**	2.184	0.193	1.022	0.406	2.846	0.141
چقرمگی شکست	2.033	0.218	2.187	0.191	1.363	0.320	1.441	0.330
شیارشدگی	**10.402**	**0.013**	2.851	0.130	0.479	0.647	1.396	0.314

1. One-way analysis of variance, anova

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر استفاده از جوان‌سازها و پلیمر بازیافتی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح آسفالتی بازیافتی (RAP) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، سه نوع جوان‌ساز مختلف در چهار درصد مختلف و پلیمر بازیافتی در چهار درصد مختلف، به‌صورت جداگانه و ترکیبی، در مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد RAP مورد استفاده قرار گرفتند. عملکرد نمونه‌ها از طریق آزمون شیارشدگی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و آزمون SCB در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ارزیابی شد. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

•افزایش درصد RAP موجب افزایش سختی مخلوط و بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی شد، به‌طوری‌که نمونه حاوی ۱۰۰ درصد RAP نسبت به مخلوط فاقد RAP حدود 40درصد عمق شیارشدگی کمتری داشت. با این حال، حضور RAP موجب کاهش مقاومت مخلوط در برابر ترک‌خوردگی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد شد.

•استفاده از جوان‌سازها موجب بهبود رفتار ترک‌خوردگی مخلوط‌های حاوی RAP شد، اما به دلیل کاهش سختی مخلوط، مقاومت در برابر شیارشدگی تا حدودی کاهش یافت. در بین جوان‌سازهای مورد بررسی، VBبهترین عملکرد را در افزایش انرژی شکست و بهبود چسبندگی ماستیک آسفالتی از خود نشان داد.

• افزودن پلیمر بازیافتی تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی داشت، به‌طوری که استفاده از 7 درصد پلیمر موجب کاهش حدود 80 درصدی عمق شیارشدگی نسبت به مخلوط کنترل (RL) شد. علاوه‌بر این، پلیمر باعث افزایش مقاومت مخلوط در برابر شروع ترک و افزایش چقرمگی شکست شد.

•استفاده هم‌زمان از جوان‌ساز و پلیمر بازیافتی توانست اثرات منفی هر یک از این افزودنی‌ها را تاحدزیادی جبران کند. درحالی‌که جوان‌ساز انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر گسترش ترک را بهبود بخشید، پلیمر کاهش مقاومت شیارشدگی ناشی از حضور جوان‌ساز را جبران کرد. این موضوع بیانگر وجود یک اثر هم‌افزایی بین این دو افزودنی در دستیابی به عملکرد متعادل‌تر مخلوط آسفالتی حاوی RAP است.

• نتایج تحلیل آماری با استفاده از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه در سطح اطمینان 95 درصد نشان داد که مقدار جوان‌ساز اثر معنی‌داری بر انرژی شکست پس از بار بیشینه و مقاومت شیارشدگی دارد ($P<0.05$)، درحالی‌که اثر آن بر انرژی شکست پیش از بار بیشینه و چقرمگی شکست از نظر آماری معنی‌دار نبود ($P>0.05$). این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب مقدار مناسب جوان‌ساز نقش مهمی در ایجاد تعادل بین مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و تغییرشکل دائمی ایفا می‌کند.

• علاوه‌بر نتایج مکانیکی، استفاده هم‌زمان از RAP ، جوان‌ساز و پلیمر بازیافتی، از دیدگاه توسعه روسازی‌های پایدار، دارای پتانسیل مناسبی برای کاهش مصرف قیر و سنگدانه‌های بکر، افزایش بهره‌گیری از مواد بازیافتی و کاهش تولید پسماندهای نفتی و پلاستیکی است. با این حال، به‌دلیل عدم دسترسی به داده‌های جامع و قابل‌اعتماد درخصوص هزینه‌های جمع‌آوری و فرآوری مواد بازیافتی، حمل‌ونقل، فناوری اختلاط و نوسانات قیمت مواد اولیه در مناطق مختلف، انجام یک تحلیل کمی هزینه–فایده یا ارزیابی چرخه عمر در چارچوب این پژوهش امکان‌پذیر نبود. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، علاوه‌بر ارزیابی عملکرد مکانیکی، تحلیل اقتصادی، ارزیابی چرخه عمر (LCA) و تحلیل انتشار کربن نیز بر پایه داده‌های واقعی پروژه‌های اجرایی انجام شود تا امکان ارزیابی جامع‌تر مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی این فناوری فراهم گردد.

•با درنظرگرفتن هم‌زمان نتایج آزمون‌های ترک‌خوردگی، شیارشدگی و تحلیل آماری، نمونه حاوی ۱۰ درصد اسیداولئیک و ۵ درصد پلیمر بازیافتی به‌عنوان ترکیب بهینه این پژوهش پیشنهاد می‌شود. این ترکیب توانست تعادل مناسبی بین بهبود مقاومت در برابر گسترش ترک و حفظ مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی ایجاد کند. علاوه‌بر این، استفاده از ۵ درصد پلیمر، در مقایسه با مقادیر بالاتر، ضمن حفظ عملکرد مناسب، موجب کاهش مصرف پلیمر، سهولت بیشتر در فرایند اختلاط و کاهش مشکلات ناشی از افزایش ویسکوزیته می‌شود. همچنین، اسید اولئیک در مقایسه با برخی جوان‌سازهای دیگر از جمله VB ، هزینه کمتری دارد؛ بنابراین، این ترکیب علاوه‌بر عملکرد مکانیکی مناسب، از دیدگاه اجرایی و اقتصادی نیز می‌تواند گزینه‌ای متعادل و کاربردی برای تولید مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP باشد. با این حال، ارزیابی دقیق اقتصادی این ترکیب نیازمند انجام تحلیل هزینه–فایده بر پایه داده‌های واقعی پروژه‌های اجرایی است.

٦. محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادات برای تحقیقات آینده

ازآنجاکه تمرکز این پژوهش بر ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی در برابر ترک‌خوردگی و شیارشدگی بود، مشخصه یابی رئولوژیکی و فیزیکی قیرهای بازیافتی و اصلاح‌شده در برنامه آزمایشگاهی این مطالعه قرار نگرفت. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، آزمون‌هایی نظیر ویسکوزیته، درجه نفوذ، نقطه نرمی و سایر آزمون‌های رئولوژیکی بر روی قیرهای بازیافتی و اصلاح‌شده انجام شود تا ارتباط بین تغییرات خواص قیر و عملکرد مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی با دقت بیشتری تبیین گردد.

یکی از محدودیت‌های این پژوهش، عدم انجام آزمون‌های ریزساختاری و رئولوژیکی برای بررسی مستقیم مکانیسم برهم‌کنش بین جوان‌سازها، پلیمر و قیر پیرشده بود. اگرچه تحلیل نتایج این پژوهش براساس رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی و یافته‌های مطالعات پیشین انجام شده است، انجام آزمون‌هایی نظیر SEM، FTIR، AFM و DSR در مطالعات آینده می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری درخصوص تغییرات ریزساختاری، تشکیل احتمالی شبکه پلیمری، نحوه برهم‌کنش جوان‌سازها با قیر پیرشده و ارتباط این تغییرات با رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی ارائه دهد.

References

[1] Antunes V, Freire A, Neves J. A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. Constr Build Mater. 2019;211:453-469.

[2] Goli A, Emadi H, Sadeghi P. Investigating the effect of using steel slag on abrasion resistance of roller-compacted concrete pavement. Innov Infrastruct Solut. 2022;7(5):297.

[3] Huang M, Dong Q, Ni F, Wang L. LCA and LCCA based multi-objective optimization of pavement maintenance. J Clean Prod. 2021;283:124583.

[4] Ma T, Wang H, Huang X, Wang Z, Xiao F. Laboratory performance characteristics of high modulus asphalt mixture with high-content RAP. Constr Build Mater. 2015;101:975-982.

[5] Daryaee D, Ameri M, Mansourkhaki A. Utilizing of waste polymer modified bitumen in combination with rejuvenator in high reclaimed asphalt pavement mixtures. Constr Build Mater. 2020;235:117516.

[6] Yousefi A, Behnood A, Nowruzi A, Haghshenas H. Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). Constr Build Mater. 2021;268:121200.

[7] Guo M, et al. Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review. J Clean Prod. 2020;266:121704.

[8] Zargar M, Ahmadinia E, Asli H, Karim MR. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. J Hazard Mater. 2012;233:254-258.

[9] García Á, Schlangen E, Van de Ven M. Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. Fuel. 2011;90(2):583-591.

[10] Zhao S, Huang B, Shu X, Woods M. Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. Constr Build Mater. 2013;44:92-100.

[11] Ziari H, Moniri A, Bahri P, Saghafi Y. The effect of rejuvenators on the aging resistance of recycled asphalt mixtures. Constr Build Mater. 2019;224:89-98.

[12] Martin AE, et al. Evaluating the effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios. Texas A&M Transportation Institute; 2020. Report No. Project 09-58.

[13] Zaumanis M, Boesiger L, Kunz B, Cavalli MC, Poulikakos L. Determining optimum rejuvenator addition location in asphalt production plant. Constr Build Mater. 2019;198:368-378.

[14] Ameri M, Mansourkhaki A, Daryaee D. Evaluation of fatigue behavior of asphalt binders containing reclaimed asphalt binder using simplified viscoelastic continuum damage approach. Constr Build Mater. 2019;202:374-386.

[15] Yan S, Dong Q, Chen X, Zhou C, Dong S, Gu X. Application of waste oil in asphalt rejuvenation and modification: A comprehensive review. Constr Build Mater. 2022;340:127784.

[16] Wang W, Huang S, Qin Y, Sun Y, Chen J. Multi-scale study on the high percentage warm-mix recycled asphalt binder based on chemical experiments. Constr Build Mater. 2020;252:119124.

[17] Cavalli MC, Zaumanis M, Mazza E, Partl MN, Poulikakos LD. Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with bio-based rejuvenators. Compos Part B Eng. 2018;141:174-181.

[18] Liu G, Nielsen E, Komacka J, Leegwater G, van de Ven M. Influence of soft bitumens on the chemical and rheological properties of reclaimed polymer-modified binders from the "old" surface-layer asphalt. Constr Build Mater. 2015;79:129-135.

[19] Cong P, Zhang Y, Liu N. Investigation of the properties of asphalt mixtures incorporating reclaimed SBS modified asphalt pavement. Constr Build Mater. 2013;113:334-340.

[20] Song W, Huang B, Shu X. Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement. J Clean Prod. 2018;192:191-198.

[21] Ziari H, Ayar P, Amjadian Y. Mechanical performance evaluation of crumb rubber enriched rejuvenator modified RAP mixtures. Constr Build Mater. 2022;342:127951.

[22] Bilema M, et al. Mechanical performance of reclaimed asphalt pavement modified with waste frying oil and crumb rubber. Materials. 2021;14(11):2781.

[23] Eltwati A, Mohamed A, Hainin MR, Jusli E, Enieb M. Rejuvenation of aged asphalt binders by waste engine oil and SBS blend: Physical, chemical, and rheological properties of binders and mechanical evaluations of mixtures. Constr Build Mater. 2022;346:128441.

[24] Goli A. The study of the feasibility of using recycled steel slag aggregate in hot mix asphalt. Case Stud Constr Mater. 2022;16:e00861.

[25] Fakhri M, Shahryari E, Ahmadi T. Investigate the use of recycled polyvinyl chloride (PVC) particles in improving the mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA). Constr Build Mater. 2022;326:126780.

[26] Al-Bayati HKA, Tighe SL. Effect of recycled concrete aggregate on rutting and stiffness characteristics of asphalt mixtures. J Mater Civ Eng. 2019;31(10):04019219.

[27] Sadeghi P, Goli A, Asadi M. Fracture Resistance of RAP Containing Recycled Polyethylene and Different Rejuvenators at Low and Medium Temperatures Using a Nonstandard SCB Test. J Mater Civ Eng. 2024;36(6):04024111.

[28] Sadeghi P, Goli A. Investigating the cracking performance of asphalt mixture containing RAP using different cracking indices. Case Stud Constr Mater. 2019;19:e02340.
[29] Molenaar A, Scarpas A, Liu X, Erkens S. Semi-circular bending test; simple but useful? Proceedings of the 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress; 2002; Barcelona, Spain.
[30] Bui HH, Saleh M. Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behaviour of asphalt concretes in the SCB test. Eng Fract Mech. 2021;242:107452.
[31] Goli A, Sadeghi P. Evaluation on the use of COVID-19 single-use face masks to improve the properties of hot mix asphalt. Road Mater Pavement Des. 2023;24(5):1371-1388.
[32] Lee J, Haddock JE, Alvarez DDB, Rahbar-Rastegar R. Quality Control and Quality Assurance of Asphalt Mixtures Using Laboratory Rutting and Cracking Tests. Indiana Department of Transportation; 2020. Report No. FHWA/IN/JTRP-2020/15.
[33] Mansourkhaki A, Ameri M, Daryaee D. Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder. Constr Build Mater. 2019;203:83-94.
[34] Taherkhani H, Noorian F. Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP). Road Mater Pavement Des. 2020;21(5):1238-1257.
[35] Zhou Z, Gu X, Dong Q, Ni F, Jiang Y. Rutting and fatigue cracking performance of SBS-RAP blended binders with a rejuvenator. Constr Build Mater. 2019;203:294-303.
[36] McDaniel RS, Anderson RM. Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual. Transportation Research Board; 2001. NCHRP Report 452.
[37] Zaumanis M, Mallick RB, Frank R. 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. Resour Conserv Recycl. 2014;92:230-245.
[38] Torres HP, Fernandes SR, Loureiro CD, Moura CF, Silva HM, Oliveira JR. Use of polymer modified binders as rejuvenators in recycled asphalt mixtures. Int J Pavement Res Technol. 2020;13(6):654-664.
[39] Azahar WNAW, Jaya RP, Hainin MR, Bujang M, Ngadi N. Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder. Constr Build Mater. 2016;126:218-226.
[40] Moghadas Nejad F, Azarhoosh A, Hamedi GH. Effect of high density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt–a laboratory study. Road Mater Pavement Des. 2014;15(3):746-756.
[41] Casey D, McNally C, Gibney A, Gilchrist MD. Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. Resour Conserv Recycl. 2008;52(10):1167-1174.
[42] Saha G, Biligiri KP. Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: A state-of-the-art review and future research. Constr Build Mater. 2016;105:103-112.
[43] Lu DX, Saleh M, Nguyen NH. Evaluation of fracture and fatigue cracking characterization ability of nonstandardized semicircular-bending test for asphalt concrete. J Mater Civ Eng. 2020;32(8):04020215.
[44] Yaghoubi E, Ahadi MR, Alijanpour Sheshpoli M, Jahanian Pahlevanloo H. Evaluating the performance of hot mix asphalt with reclaimed asphalt pavement and heavy vacuum slops as rejuvenator. Int J Transp Eng. 2013;1(2):115-124.
[45] Goli A, Sadeghi P, Karimi A. Evaluating the Macrocrack Self-Healing Properties of Stone Mastic Asphalt Incorporating Cigarette Filters as Microwave-Absorbing Additives. J Mater Civ Eng. 2026;38(1):04025526.
[46] Goli A, Moghadas B, Sadeghi P. Evaluating the effects of additives, gradation and traffic conditions on damping ratio and resonant frequency in asphalt mixtures. Int J Pavement Eng. 2025;26(1):2513455.
[47] Goli A, Sadeghi P, Karimi A, Shojaei M, Kazemi M. Advancing Crack Resistance and Environmental Sustainability in Asphalt: Investigating Recycled Cigarette Filters in Stone Matrix Asphalt. J Mater Civ Eng. 2025;37(7):04025208.

.

Applied Research in Infrastructure Engineering Open Access

Spring & Summer (2026) 35-52
DOI:

ORIGINAL ARTICLE

Evaluation of the Effect of Rejuvenators and Recycled Polymers on the Cracking and Rutting Resistance of Recycled Asphalt Mixtures

Peyman Sadeghi[1], Ahmad Goli[2*]

1. M.Sc. in Civil Engineering (Road and Transportation Engineering), University of Isfahan, Isfahan, Iran.
2. Associate Professor of Civil Engineering (Road and Transportation), Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Correspondence:
Ahmad Goli
Email: a.goli@trn.ui.ac.ir

Received: 29 Apr 2025
Accepted: 06 Sep 2026

How to cite:
Goli, A. & Sadeghi, P. (2026). Evaluation of the Effect of Rejuvenators and Recycled Polymers on the Cracking and Rutting Resistance of Recycled Asphalt Mixtures. *Applied Research in Infrastructure Engineering*, 1(1), 35-52.
(DOI:)

ABSTRACT

The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) has gained increasing importance due to the scarcity of natural resources—such as bitumen and aggregates—as well as concerns regarding global warming, rising greenhouse gas emissions, and economic challenges. However, incorporating RAP into asphalt mixtures can compromise cracking resistance due to the presence of aged bitumen. To address these issues, the use of rejuvenators has been proposed; yet, their application may negatively affect high-temperature performance and rutting resistance. In this study, various rejuvenators were initially employed to enhance the cracking resistance of asphalt mixtures containing RAP; subsequently, recycled high-density polyethylene (R-HDPE) was used to counteract the reduction in rutting resistance. Three distinct types of rejuvenators—waste engine oil (WEO), oleic acid, and VB—were utilized. Three different RAP contents (0%, 50%, and 100%) were used to prepare the specimens. Finally, each rejuvenator and polymer was added—both individually and in combination—at four different dosage levels to asphalt mixtures containing 50% RAP. Finally, the performance of the samples was evaluated at intermediate and high temperatures. To this end, rutting resistance tests were conducted at 50°C, and SCB tests were performed at 25°C. The results indicated that the simultaneous use of a rejuvenator and a polymer could improve crack resistance without compromising rutting resistance.

KEYWORDS

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), rejuvenator, recycled polymer, cracking, rutting.

Copyright © 2026 The Authors. Published by Payame Noor University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.